



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Dasar-Dasar Sistem Proteksi¹

Sistem proteksi adalah pengaman listrik pada sistem tenaga listrik yang terpasang pada : sistem distribusi tenaga listrik, trafo tenaga, transmisi tenaga listrik dan generator listrik yang dipergunakan untuk mengamankan sistem tenaga listrik dari gangguan listrik atau beban lebih, dengan cara memisahkan bagian sistem tenaga listrik yang terganggu. Sehingga sistem kelistrikan yang tidak terganggu dapat terus bekerja (mengalirkan arus ke beban atau konsumen). Jadi pada hakekatnya pengaman pada sistem tenaga listrik yaitu mengamankan seluruh sistem tenaga listrik supaya kehandalan tetap terjaga.

Adapun macam-macam gangguan yang sering terjadi pada sistem tenaga listrik seperti :

1. Gangguan beban lebih

Gangguan ini sebenarnya bukan gangguan murni, tetapi bila dibiarkan terus-menerus berlangsung dapat merusak peralatan listrik yang dialiri oleh arus tersebut.

2. Gangguan Hubung Singkat

Gangguan hubung singkat dapat terjadi antar fasa (3 fasa atau 2 fasa), 2 fasa ke tanah dan 1 fasa ke tanah yang sifatnya bisa temporer atau permanen.

3. Gangguan tegangan lebih

Gangguan tegangan lebih terjadi akibat adanya kelainan pada sistem tenaga listrik, seperti tegangan lebih karena adanya surja petir yang mengenai peralatan listrik.

4. Gangguan Ketidakstabilan

Gangguan ini disebabkan karena adanya gangguan hubung singkat di sistem tenaga listrik atau lepasnya pembangkit, yang dapat menyebabkan unit-unit pembangkit lepas sinkron.



Untuk mengurangi akibat-akibat negatif dari berbagai macam gangguan tersebut, maka diperlukan rele proteksi.

2.1.1 Daerah Sistem Proteksi

Di dalam sistem proteksi tenaga listrik, seluruh komponen harus diamankan dengan tetap menekankan selektivitas kerja peralatan/rele pengaman. Untuk mencapai hal ini, sistem tenaga listrik dibagi menjadi daerah-daerah (zona) pengaman seperti berikut :

- Proteksi pada Generator
- Proteksi pada Transformator
- Proteksi pada Transmisi
- Proteksi pada Distribusi

Dalam sistem proteksi pembagian tugas dapat diuraikan menjadi :

- a. Proteksi utama, berfungsi untuk mempertinggi kehandalan, kecepatan kerja, dan fleksibilitas sistem proteksi terhadap sistem tenaga.
- b. Proteksi pengganti, berfungsi jika proteksi utama menghadapi kerusakan untuk mengatasi gangguan yang terjadi.
- c. Proteksi tambahan, berfungsi untuk pemakaian pada waktu tertentu sebagai pembantu proteksi utama pada daerah tertentu yang dibutuhkan.

2.1.2 Persyaratan Sistem Proteksi²

Pada sistem proteksi tenaga listrik, ada beberapa persyaratan yang harus dipenuhi demi mengamankan peralatan-peralatan listrik yang ada. Untuk itu ada beberapa persyaratan yang harus dipenuhi oleh suatu sistem proteksi, seperti berikut ini :

1. Selektivitas

Selektivitas suatu sistem proteksi jaringan tenaga adalah kemampuan rele proteksi untuk melakukan tripping secara tepat sesuai rencana yang telah ditentukan pada saat mendesain sistem proteksi tersebut.



Dalam pengertian lain, selektivitas berarti rele harus mempunyai daya beda, sehingga mampu dengan tepat memilih bagian yang terkena gangguan. Kemudian rele bertugas mengamankan peralatan dengan cara mendeteksi adanya gangguan dan memberikan perintah kepada pemutus tenaga (PMT) agar pemutus tenaga membuka kontakannya sehingga hanya memutuskan pada daerah yang terganggu.

2. Stabilitas

Stabilitas sistem proteksi biasanya terkait dengan skema unit proteksi, yang dimaksudkan untuk menggambarkan kemampuan sistem proteksi tertentu untuk tetap bertahan pada karakteristik kerjanya dan tidak terpengaruh faktor luar di luar daerah proteksinya, misalnya pada arus beban lebih dan arus gangguan lebih.

Dengan kata lain, stabilitas dapat juga didefinisikan sebagai kemampuan untuk tetap konsisten hanya bekerja pada daerah proteksi di mana dia dirancang tanpa terpengaruh oleh berbagai parameter luar yang tidak merupakan besaran yang perlu diperhitungkan.

3. Kecepatan

Fungsi sistem proteksi adalah untuk mengatasi gangguan secepat dan sesegera mungkin. Tujuan utamanya adalah mengamankan kontinuitas pasokan daya dengan menghilangkan setiap gangguan sebelum gangguan tersebut berkembang atau meluas ke arah yang membahayakan stabilitas dan hilangnya sinkronisasi sistem yang pada akhirnya dapat merusak sistem tenaga tersebut. Seperti isolasi bocor akibat adanya gangguan tegangan lebih terlalu lama sehingga peralatan listrik yang diamankan dapat mengalami kerusakan.

Namun demikian, sistem proteksi atau yang sering disebut rele proteksi ini tidak boleh bekerja terlalu cepat (kurang dari 10ms). Disamping itu, waktu kerja rele tidak boleh melampaui waktu penyetelan kritis. Pada sistem yang besar atau luas, kecepatan pada rele proteksi sangat diperlukan karena untuk menjaga kestabilan sistem agar tidak terganggu.



4. Sensitivitas

Sensitivitas adalah istilah yang sering dikaitkan dengan harga besaran penggerak minimum, seperti level arus minimum, tegangan, daya dan besaran lain dimana rele atau skema proteksi masih dapat bekerja dengan baik. Suatu rele disebut sensitif bila parameter operasi utamanya rendah. Artinya, semakin rendah besaran parameter penggerak maka perangkat tersebut dikatakan semakin sensitif. Sehingga rele harus dapat bekerja pada awal terjadinya gangguan.

2.2 Rele Proteksi³

Rele proteksi adalah susunan peralatan pengaman yang dapat merasakan atau mengukur adanya gangguan atau ketidakstabilan sistem, yang kemudian secara otomatis dapat memberikan respon berupa sinyal untuk menggerakkan sistem mekanis pemutus tenaga agar dapat terpisahkan bagian yang terganggu. Rele proteksi biasanya digunakan untuk mendeteksi adanya gangguan pada sistem tenaga listrik, terutama untuk :

- a. Memberikan tanda bahaya atau membuka circuit breaker (CB) sehingga memisahkan sebagian dari sistem tersebut selama terjadinya kondisi yang tidak normal.
- b. Memutuskan bagian sistem yang tidak normal sehingga mencegah kesalahan berikutnya.
- c. Melepas pemutus tenaga apabila gangguan dianggap membahayakan peralatan-peralatan listrik seperti : generator, trafo, dan sebagainya.

Gangguan dalam sistem tenaga listrik tidak dapat dihindarkan, akan tetapi dapat mengurangi atau membatasi akibat dari gangguan tersebut sekecil mungkin dan dalam waktu sesingkat mungkin dengan menggunakan rele proteksi.

2.3 Tujuan Rele Proteksi

Tujuan rele proteksi yang digunakan pada sistem tenaga listrik adalah :



- a. Mencegah kerusakan peralatan-peralatan pada sistem tenaga listrik akibat terjadinya gangguan atau kondisi operasi sistem yang tidak normal.
- b. Mengurangi kerusakan peralatan-peralatan pada sistem tenaga listrik akibat terjadinya gangguan atau kondisi operasi sistem yang tidak normal.
- c. Mempersempit daerah yang terganggu sehingga gangguan tidak melebar pada sistem yang lebih luas.
- d. Memberikan pelayanan tenaga listrik dengan kehandalan dan mutu tinggi kepada konsumen.
- e. Mengamankan manusia dari bahaya yang ditimbulkan oleh tenaga listrik.

2.4 Klasifikasi Rele Proteksi

Rele – rele yang akan digunakan dalam sistem proteksi tenaga listrik dapat diklasifikasikan sebagai berikut :

2.4.1 Berdasarkan prinsip kerja

Rele proteksi ditinjau berdasarkan prinsip kerjanya dapat diklasifikasikan menjadi tiga yaitu :

1. Rele Temperatur (*Thermal Relay*)

Rele jenis ini bekerja berdasarkan pengaruh panas, yaitu mendeteksi arus listrik dengan pertambahan temperatur yang ditimbulkan akibat arus yang melewatinya. Rele proteksi ini juga dapat bekerja karena ketidak seimbangan arus listrik yang menyebabkan kenaikan temperatur akibat komponen urutan negatif. Rele jenis ini sering dipakai untuk memproteksi peralatan sistem terhadap kehadiran arus yaitu dengan mendeteksi panas yang terjadi akibat arus lebih tersebut.



2. Rele Elektromagnetik (*Electromagnetic Relay*)

Rele jenis elektromagnetik ini dapat bekerja menggunakan sumber bolak – balik atau sumber arus searah sebagai penginduksi kumparan untuk membentuk magnet pada kumparan yang fungsinya untuk menggerakkan anak kontak untuk memutuskan rangkaian.

3. Rele Statis (*Static Relay*)

Rele proteksi jenis statis adalah rele proteksi yang bekerja dengan menggunakan komponen – komponen elektronik seperti : transistor, dioda dan thyristor.

2.4.2 Berdasarkan Besar Ukuran dan Fungsinya

Sistem proteksi ditinjau berdasarkan besaran ukuran dan fungsinya dapat diklasifikasikan menjadi lima yaitu :

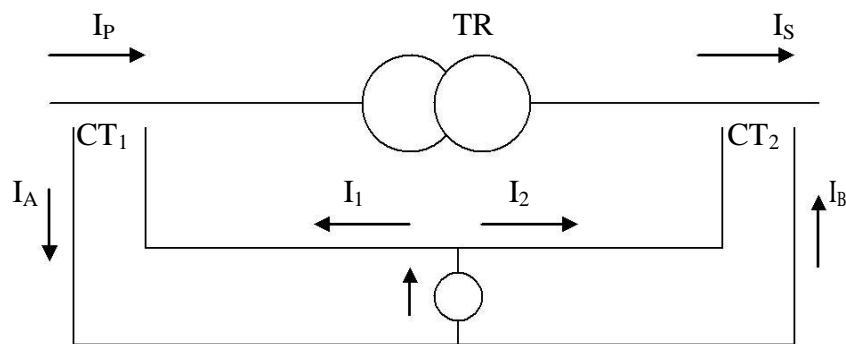
- a. Rele proteksi yang bekerja bila besar ukurannya turun sampai dibawah harga tertentu, rele jenis ini contohnya : rele tegangan kurang (*Under Voltage Relay*), rele frekuensi kurang (*Under Frekuensi Relay*).
- b. Rele proteksi yang akan bekerja bila besaran ukurnya melebihi harga tertentu, rele jenis ini contohnya : rele arus lebih (*Over Current Relay*), rele tegangan lebih (*Over Voltage Relay*).
- c. Rele Daya yaitu jenis rele berarah, rele ini akan bekerja bila arah daya mengalir ke suatu arah tertentu yang tidak dikehendaki.
- d. Rele proteksi jenis differensial yaitu jenis rele proteksi yang akan bekerja berdasarkan perbedaan tegangan atau perbedaan arus antar fasa.
- e. Rele jarak yaitu rele proteksi yang bekerjanya berdasarkan pada perbandingan harga tegangan dan arus. Jadi dapat dikatakan bahwa besaran yang dideteksi adalah impedansi.

2.5 Fungsi dan Prinsip Kerja Rele Proteksi⁴

Kita ketahui bahwa rele proteksi pada transformator terdiri dari beberapa jenis antara lain :

2.5.1 Rele Differensial

Rele differensial pada sistem proteksi digunakan untuk mengamankan transformator terhadap gangguan hubung singkat yang terjadi di dalam transformator dan daerah kerjanya yang dibatasi oleh transformator arus. Prinsip kerja rele differensial yaitu membandingkan dua besaran arus. Daerah proteksi rele differensial dibatasi pemasangan transformator arus dimana rele tersebut dipasang.



Gambar 2.1. Prinsip Kerja Rele Diferensial Keadaan normal

Pada keadaan normal (tidak terjadi gangguan) arus yang mengalir pada sisi skunder transformator arus CT1 dan CT2 sama besar dan masing-masing mengalir sesuai dengan arah I_A untuk arus I_1 , dan I_B arus I_2 , maka dapat didefinisikan melalui persamaan :

$$I_D = (I_1 - I_2)$$

$$I_D = 0$$

2.5.2 Rele Bucholz

Sebagaimana kita ketahui, isolator sekaligus sebagai bahan pendingin transformator menggunakan minyak transformator. Suatu kenyataan adalah bila terjadi gangguan atau kerusakan di dalam transformator maka di dalam minyak itu akan timbul atau berbentuk sejumlah gas. Prinsip pengaman dengan menggunakan rele bucholz berdasarkan uraian gas-gas yang terbentuk, karena gas-gas yang terbentuk menunjukkan jenis gangguan yang terjadi.



Gangguan-gangguan yang dapat menyebabkan kontak rele bucholz bekerja adalah :

- a. Pemanas setempat
- b. Kontak – kontak listrik yang kurang baik
- c. Hubung singkat yang terjadi di dalam lapisan inti
- d. Kerusakan isolasi antara inti dengan baut
- e. Kemasukan udara di dalam benjana sehingga menimbulkan korosi atau pengkaratan sehingga dapat menyebabkan hubung singkat
- f. Kehilangan minyak akibat kebocoran, sehingga transformator kekurangan minyak

Sedangkan kerusakan – kerusakan yang lebih serius yang dapat menyebabkan rele bucholz bekerja adalah :

- a. Hubung singkat antara belitan
- b. Hubung singkat antara belitan dengan tanah
- c. Hubung singkat antara fasa
- d. kerusakan isolator pada transformator

Perlu diketahui bahwa agar rele bucholz dapat bekerja secara efektif, desain transformator dan terutama dari benjananya, harus diatur sedemikian rupa. Sehingga gelembung-gelembung gas yang terjadi tidak akan tersangkut dan tertinggal di dalam benjana transformator, melainkan akan naik dan mengalir ke wadah atupun benjana B.

2.5.3 Rele Tangki Tanah

Rele ini berfungsi untuk mengamankan transformator terhadap hubung singkat antara kumparan dengan tangki transformator yang titik netralnya ditanahkan. Rele yang digunakan untuk mengatasi hal ini adalah rele tangki tanah yang berfungsi untuk mendeteksi arus hubung singkat, sehingga rele hanya dapat merasakan gangguan tanah dan efektif pada transformator yang titik netralnya ditanahkan. Agar lebih efektif lagi, maka antara tangki transformator dan tanah



harus dibatasi dengan isolator.

Tujuan dibatasi oleh isolator ini agar bila terjadi hubung singkat antara kumparan dengan tangki transformator, arus hubung singkat ini seluruhnya mengalir ke transformator arus yang menghubungkan rele tangki tanah setelah itu baru arus mengalir ke tanah.

2.5.4 Rele Gangguan Tanah Terbatas

Rele gangguan tanah terbatas ini berfungsi untuk mengamankan transformator terhadap gangguan tanah didekat titik netral yang tidak dapat terdeteksi oleh rele differensial. Rele gangguan tanah terbatas hanya dipasang pada transformator yang titik netralnya ditanahkan langsung atau pentanahan melalui tahanan.

Rele gangguan tanah terbatas ini dipasang untuk mengimbangi rele differensial yang tingkat sensitifnya terbatas dibandingkan dengan rele gangguan tanah terbatas, terutama dalam mendeteksi terjadinya hubung singkat di dekat titik netral.

Prinsip kerja rele gangguan tanah terbatas adalah sebagai berikut : Bila terjadi gangguan tanah di luar daerah proteksinya, maka tidak akan ada arus yang mengalir ke rele dan rele tidak akan bekerja. Tetapi bila terjadi gangguan tanah di dalam daerah proteksinya akan timbul arus gangguan dan arus mengalir ke rele, dengan demikian maka rele gangguan tanah terbatas akan bekerja untuk mengisolir gangguan.

2.5.5 Rele Tekanan Lebih

Jika terjadi tekanan yang berlebihan di dalam transformator akibat gangguan dalam (*Internal Fault*) tekanan tersebut akan berusaha mendesak ke tempat-tempat bagian dalam tangki transformator yang bertekanan rendah. Bila tekanan di dalam transformator naik terus dan melebihi kekuatan tekanan diafragma rele akan mendapat tekanan lebih, maka diafragma rele akan mendapat tekanan secara terus menerus yang semakin lama semakin besar dan



akhirnya diafragma akan pecah.

Dengan pecahnya diafragma ini, jarum pemecah akan keluar karena kekuatan pegas dan akan mengerjakan switch. Dan switch ini akan membuat transformator menjadi trip dan memutuskan rangkaian. Transformator yang mengalami kerusakan internal fault ini akan off dan tidak beroperasi lagi, dengan demikian transformator dapat diselamatkan.

2.5.6 Rele Suhu

Rele suhu ini merupakan rele mekanis yang berfungsi untuk mendeteksi suhu minyak dan suhu kumparan secara langsung dan dipasang pada semua transformator. Rele suhu ini dilengkapi dengan transformator arus dan pendeteksi temperatur.

Pada rele suhu ini mempunyai dua buah rele sensor sebagai pendeteksi terhadap perubahan suhu pada transformator yaitu :

1. Rele suhu untuk mendeteksi perubahan suhu pada minyak transformator
2. Rele suhu untuk mendeteksi perubahan suhu pada kumparan transformator

Prinsip kerja rele suhu adalah sebagai berikut :

- **Rele Suhu Minyak**

Rele ini mempunyai sensor temperatur yang ditempatkan pada tangki transformator yang berisi minyak yang terletak di bagian atas tangki transformator. Sensor temperatur tersebut dihubungkan ke peralatan melalui pipa kapiler.

- **Rele Suhu Kumparan**

Pada rele suhu kumparan juga mempunyai sensor temperatur. Sensor temperatur mendapat panas dari elemen pemanas yang dialiri arus listrik dari transformator arus yang sebanding dengan arus beban ke transformator. Sensor temperatur juga dihubungkan ke peralatan melalui pipa kapiler.

- Besaran panas yang diterima oleh sensor temperatur diubah menjadi energi
-

mekanis untuk menggerakkan suatu poros yang mempunyai jarum penunjuk suhu dan beberapa kontak. Kontak-kontak ini bekerja secara bertahap sesuai dengan kenaikan suhu. Tahap pertama akan menjalankan sistem pendingin. Bila ini masih belum teratasi maka tahap kedua adalah memberikan sinyal tanda bahaya atau alarm dan tahap terakhir adalah memberikan perintah trip kepada PMT.

2.5.7 Rele Beban Lebih

Rele ini mempunyai fungsi untuk mengamankan transformator terhadap gangguan beban lebih. Prinsip kerja rele beban lebih atau rele thermis ini berdasarkan perubahan yang temperatur yang bekerjanya menggunakan bimetal. Bimetal yang dialiri arus listrik dari transformator arus ini mempunyai ketebalan tertentu dan ketebalan ini yang akan mempengaruhi kecepatan rele untuk bekerja.

2.5.8 Rele Arus Berarah

Rele arus berarah ini berfungsi untuk mengamankan transformator terhadap gangguan hubung singkat dua fasa dan tiga fasa, akan tetapi rele arus berarah hanya akan bekerja untuk arah tertentu. Rele arus berarah mempunyai dua elemen yaitu :

1. Elemen arah, yaitu untuk menentukan arah kerja rele
2. Elemen kerja, yaitu elemen yang berfungsi untuk mendeteksi besaran arus gangguan

2.6 Rele Arus Lebih (*Over Current Relay*)

Rele arus lebih adalah rele yang bekerja berdasarkan arus, yang mana rele ini akan bekerja apabila terjadi arus yang melampaui batas tertentu yang telah ditetapkan yang disebut arus kerja atau arus setting rele.

Didalam distribusi, rele arus lebih ini sering juga disebut pengaman gangguan antar fasa yang dipergunakan untuk mengamankan sistem distribusi, jika ada gangguan hubung singkat 3 fasa atau 2 fasa. Pemasangan rele ini terdapat

di *incoming feeder* (penyulang masuk), *outgoing feeder* (penyulang keluar) atau di gardu hubung.

Keuntungan dari penggunaan proteksi rele arus lebih ini antara lain :

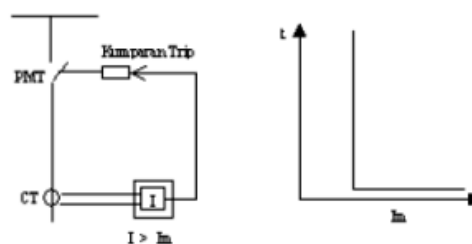
- Sederhana dan murah
- Mudah Penyetelan
- Dapat berfungsi sebagai pengaman utama dan cadangan
- Mengamankan gangguan hubung singkat antar fasa atau satu fasa ke tanah
- Pengaman cadangan untuk generator, trafo, dan saluran transmisi

2.6.1 Karakteristik Rele Arus Lebih⁵

Rele arus lebih mempunyai bermacam-macam karakteristik seperti :

a. Rele Arus Lebih Waktu Seketika

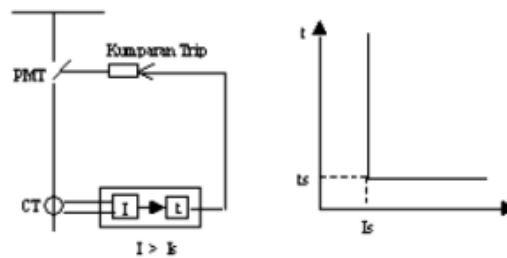
Rele arus lebih dengan karakteristik waktu kerja seketika ialah jika jangka waktu rele mulai saat rele arusnya pick up sampai selesainya kerja rele sangat singkat (10~20 ms), yaitu tanpa penundaan waktu. Rele ini jarang berdiri sendiri tetapi umumnya dikombinasikan dengan rele arus lebih dengan karakteristik waktu tertentu atau waktu terbalik.



Gambar 2.2. Karakteristik Rele Arus Lebih Waktu Seketika

b. Rele Arus Lebih Waktu Tertentu

Rele ini akan memberikan perintah pada PMT pada saat terjadi gangguan hubung singkat dan besarnya arus gangguan melampaui settingnya (I_s), dan jangka waktu kerja rele ini mulai pick up sampai kerja rele diperpanjang dengan waktu tertentu dan tidak tergantung dari besarnya arus yang menggerakkan rele.



Gambar 2.3. Karakteristik Rele Arus Lebih Waktu Tertentu

c. Rele Arus Lebih Waktu Terbalik⁶

Rele ini akan bekerja dengan waktu tunda yang tergantung dari besarnya arus secara terbalik, makin besar arus makin kecil waktu tundanya. Karakteristik ini bermacam-macam dan setiap pabrik dapat membuat karakteristik yang berbeda-beda.

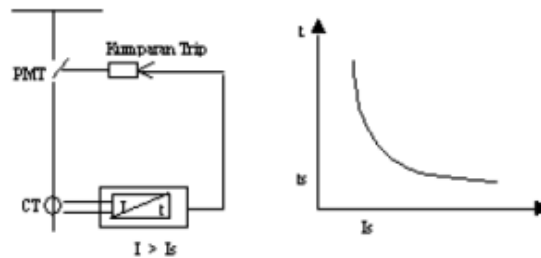
Karakteristik waktu terbalik sesuai IEC 60255-3 dan BS 142 19666 adalah sebagai berikut :

$$T = \frac{\beta}{\left(\left(\frac{If}{I_{set}}\right)^{\alpha} - 1\right)} T_{ms} \text{ (detik)} \dots\dots\dots(2.1)$$

$$T_{ms} = \frac{\left(\left(\frac{If}{I_{set}}\right)^{\alpha} - 1\right)}{\beta} t \dots\dots\dots(2.2)$$

karakteristik waktunya dibedakan dalam beberapa kelompok :

1. Berbanding terbalik (*inverse*), dimana $\alpha = 0,02$ dan $\beta = 0,14$
2. Sangat berbanding terbalik (*very inverse*), dimana $\alpha = 1$ dan $\beta = 13,2$
3. Sangat berbanding terbalik sekali (*extremely inverse*), dimana $\alpha = 2$ dan $\beta = 80$
4. Sangat sangat berbanding terbalik sekali (*Long Inverse*) , dimana $\alpha = 1$ dan $\beta = 120$

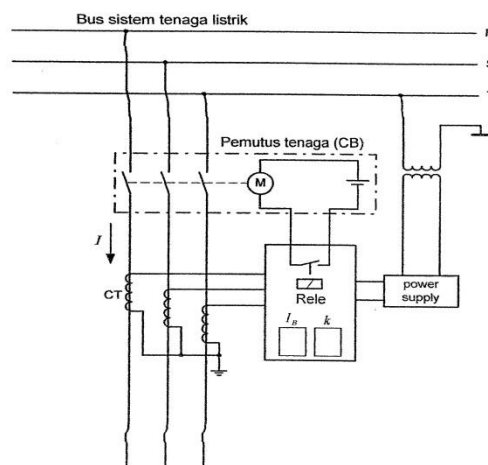


Gambar 2.4. Karakteristik Rele Arus Lebih Waktu Terbalik

Setelan Rele dengan mempergunakan karakteristik waktu terbalik ini biasanya dipergunakan pada sistem distribusi tenaga listrik sebagai setelan rele yang terpasang di *incoming feeder*, *outgoing feeder*, atau rele yang terpasang di gardu hubung atau *recloser*, dimana penyetelan arus dan waktu pada rele arus lebih dan gangguan tanah di dasarkan pada besarnya arus gangguan hubung singkat yang di setel pada sisi hilir sampai dengan sisi hulu (dari gardu hubung sampai gardu induk).

2.6.2 Prinsip Kerja

Prinsip kerja rele arus lebih adalah berdasarkan adanya arus lebih yang dirasakan rele, baik disebabkan adanya gangguan hubung singkat ataupun *overload* (beban lebih) dan kemudian memberikan perintah trip ke PMT sesuai dengan karakteristik waktunya. Untuk prinsip kerja rele ini kita dapat lihat pada gambar rangkaian dibawah ini :



Gambar 2.5. Peralatan dan Hubungan Sistem Pengaman



Cara kerjanya dapat diuraikan sebagai berikut :

- Pada kondisi normal arus beban (I_b) mengalir pada SUTM / SKTM dan pada trafo arus besaran arus ini di transformasikan ke besaran sekunder (I_r). Arus sekunder (I_r) mengalir pada kumparan rele tetapi karena arus ini masih lebih kecil dari pada suatu harga yang ditetapkan (setting), maka rele tidak bekerja.
- Bila terjadi gangguan hubung singkat, arus beban (I_b) akan naik dan menyebabkan arus sekunder (I_r) naik juga, apabila arus sekunder (I_r) naik melebihi suatu harga yang telah ditetapkan (diatas setting), maka rele akan bekerja dan memberikan perintah trip pada tripping coil untuk bekerja dan membuka PMT, sehingga SUTM / SKTM yang terganggu dipisahkan dari jaringan.

2.6.3 Koordinasi Rele dalam Sistem⁷

Hampir semua peralatan seperti kabel, penghantar, trafo, dan generator memakai rela arus lebih. Untuk mendapatkan pengaman yang selektif didalam sistem, perlu diadakan koordinasi yang baik antara rele-rele pengaman dengan sistem.

Yang dimaksud selektif disini adalah apabila terjadi gangguan pada salah satu bagian sistem maka hanya pemutus tenaga yang paling dekat dengan bagian sistem yang terganggu saja, sehingga bagian sistem yang tidak mengalami gangguan akan tetap mengalirkan daya.

Adapun gangguan yang mungkin terjadi di dalam sistem pada jaringan adalah :

- a. Gangguan 3 fasa dan
- b. Gangguan 2 fasa

Untuk menghitung arus gangguan hubung singkat pada sistem seperti di atas pertama yang harus di hitung adalah :

1. Impedansi Sumber (Reaktansi) yang hal ini di dapat dari data hubung



singkat di bus 150 kV yang ada pada Gardu Induk.

2. Menghitung Impedansi Transformator Tenaga
3. Menghitung Impedansi Penyulang

Kemudian setelah mendapatkan nilai dari ketiga hal di atas maka barulah dapat menghitung Impedansi Ekvivalen yang kita butuhkan untuk menghitung nilai dari gangguan hubung singkat tersebut.

2.7 Rumus-Rumus Dasar⁸

2.7.1 Impedansi Sumber / Reaktansi

Beberapa perusahaan listrik memberikan data pada pelanggan untuk menetapkan pemutus rangkaian bagi instalasi industri atau sistem distribusi yang di hubungkan pada sistem pemakaian. Biasanya data tadi berupa daftar *megavoltampere* hubung singkat, dimana :

$$MVA = \sqrt{3} \times (KV) \times I_{sc} \dots\dots\dots(2.3)$$

Dengan menyelesaikan persamaan diatas, maka di hasilkan :

$$X_{sc} = \frac{kV^2}{MVA} \dots\dots\dots(2.4)$$

Dimana :

X_{sc} = Impedansi sumber

KV = Tegangan sisi primer trafo tenaga

MVA = Data hubung singkat di bus 70 kV

2.7.2 Impedansi Transformator

Pada perhitungan impedansi suatu transformator yang diambil adalah harga reaktansinya, sedangkan tahanannya diabaikan karena harganya kecil. Untuk mencari nilai reaktansi trafo dalam Ohm dihitung dengan cara sebagai berikut.



Langkah pertama mencari nilai ohm pada 100% untuk trafo pada 20 kV, yaitu dengan menggunakan rumus :

$$X_T \text{ pada } 100\% = \frac{kV^2}{MVA} \dots\dots\dots(2.5)$$

Dimana :

X_T = Impedansi trafo tenaga

kV = Tegangan sisi sekunder trafo tenaga

MVA= Kapasitas daya trafo

Lalu tahap selanjutnya yaitu mencari nilai reaktansi tenaganya :

- Untuk menghitung reaktansi urutan positif dan negatif ($X_{t1} = X_{t2}$) dihitung dengan menggunakan rumus :

$$X_T = \% \text{ yang diketahui } \times X_t \text{ pada } 100\% \dots\dots\dots(2.6)$$

- Sebelum menghitung reaktansi urutan nol (X_{t0}) terlebih dahulu harus diketahui data trafo tenaga itu sendiri yaitu data dari kapasitas belitan delta yang ada dalam trafo :
 1. Untuk trafo dengan hubungan belitan Y dimana kapasitas belitan delta sama besar dengan kapasitas belitan Y, maka $X_{t0} = X_{t1}$.
 2. Untuk trafo dengan hubungan belitan Yyd dimana kapasitas belitan delta (d) biasanya adalah sepertiga dari kapasitas belitan Y (belitan yang dipakai untuk menyalurkan daya, sedangkan belitan delta tetap ada di dalam tetapi tidak dikeluarkan kecuali satu terminal delta untuk ditanahkan), maka nilai $X_{t0} = 3 \times X_{t1}$.
 3. Untuk trafo dengan hubungan belitan YY dan tidak mempunyai belitan delta di dalamnya, maka untuk menghitung besarnya X_{t0} berkisar antara 9 s/d 14 x X_{t1} .

2.7.3 Impedansi penyulang

Untuk perhitungan impedansi penyulang, perhitungannya tergantung dari



besarnya impedansi per km dari penyulang yang akan dihitung, dimana besar nilainya tergantung pada jenis penghantarnya, yaitu dari bahan apa penghantar tersebut dibuat dan juga tergantung dari besar kecilnya penampang dan panjang penghantarnya

Disamping itu penghantar juga dipengaruhi perubahan temperatur dan konfigurasi dari penyulang juga sangat mempengaruhi besarnya impedansi penyulang tersebut. Contoh besarnya nilai impedansi suatu penyulang : $Z = (R + jX)$ Sehingga untuk impedansi penyulang dapat ditentukan dengan menggunakan rumus sebagai berikut :

$$Z_1 = Z_2 = \text{panjang penyulang (km)} \times Z_{\text{penghantar}} \dots\dots\dots(2.7)$$

Untuk mendapatkan impedansi penyulang secara keseluruhan maka simulasikan lokasi gangguan per 25%, 50%, 75% dan 100%, maka dapat dibuat :

$$Z_1 = Z_2 = \text{Per 25\%, 50\%, 75\%, dan 100\%} \times \text{Panjang penyulang} \times Z_1 \dots\dots\dots(2.8)$$

Dimana :

Z_1 = Impedansi urutan positif

Z_2 = Impedansi urutan negative

2.7.4 Impedansi Ekvivalen Jaringan

Perhitungan yang akan dilakukan di sini adalah perhitungan besarnya nilai impedansi ekivalen positif, negatif dan nol dari titik gangguan sampai ke sumber. Karena dari sejak sumber ke titik gangguan impedansi yang terbentuk adalah tersambung seri maka perhitungan Z_{1ek} dan Z_{2ek} dapat langsung dengan cara menjumlahkan impedansi tersebut.

Dan untuk mendapatkan impedansi penyulang secara keseluruhan maka disimulasikan lokasi gangguan per 25%, 50%, 75% dan 100%, Sehingga untuk impedansi ekivalen jaringan dapat dihitung dengan menggunakan rumus:

$$Z_{1ek} = Z_{2ek} = \sqrt{((\% \cdot R_{1j} + R_f)^2 + (X_{sc} + X_T + \% \cdot X_{1j})^2)} \dots\dots\dots(2.9)$$



Dimana :

Z_{1ek} = Impedansi ekivalen jaringan urutan positif

Z_{2ek} = Impedansi ekivalen jaringan urutan negatif

X_{sc} = Impedansi sumber sisi 20 kV

X_T = Impedansi trafo tenaga urutan positif dan negatif

R_1 = Tahanan penghantar

X_1 = Reaktansi penghantar

Setelah mendapatkan impedansi ekivalen dengan lokasi gangguan, selanjutnya perhitungan arus gangguan hubung singkat dapat dihitung dengan menggunakan rumus dasar seperti yang sudah di jelaskan sebelumnya, hanya impedansi ekivalen yang dimasukkan ke dalam rumus dasar tersebut dan tergantung dari jenis gangguan hubung singkatnya dimana gangguan hubung singkat tersebut baik 3 fasa ataupun 2 fasa.

2.7.5 Arus Gangguan Hubung Singkat 3 Fasa

Rumus dasar yang digunakan untuk menghitung besarnya arus gangguan hubung singkat tiga fasa adalah :

$$I = \frac{V}{Z} \dots\dots\dots (2.10)$$

Sehingga arus gangguan hubung singkat tiga fasa dapat dihitung dengan menggunakan rumus :

$$I_{3fasa} = \frac{V_{ph}}{Z_{1ek}} \dots\dots\dots (2.11)$$

Dimana :

I_{3fasa} = Arus gangguan hubung singkat tiga fasa

V_{ph} = Tegangan fasa - netral sistem 20 kV = $\frac{20000}{\sqrt{3}}$ v

Z_{1ek} = Impedansi ekivalen urutan positif



2.7.6 Arus Gangguan Hubung Singkat 2 Fasa

Rumus dasar yang digunakan untuk menghitung besarnya arus gangguan hubung singkat dua fasa adalah :

$$I = \frac{V}{Z} \dots\dots\dots (2.12)$$

Sehingga arus gangguan hubung singkat dua fasa dapat dihitung dengan menggunakan rumus :

$$I_{2fasa} = \frac{V_{ph-ph}}{Z_{1ek} + Z_{2ek}} \dots\dots\dots (2.13)$$

Karena $Z_{1ek} = Z_{2ek}$, maka:

$$I_{2fasa} = \frac{V_{ph-ph}}{2 \times Z_{1ek}} \dots\dots\dots (2.14)$$

Dimana :

I_{2fasa} = Arus gangguan hubung singkat dua fasa

V_{ph-ph} = Tegangan fasa - fasa sistem 20 kV = $\frac{20000}{\sqrt{3}}$ v

Z_{1ek} = Impedansi urutan positif

Bila dalam sistem 3 fasa, ketiga fasanya di bebani dengan suatu impedansi Z maka pada sistem ini dua fasanya dibebani suatu impedansi Z pada masing-masing fasanya kemudian di hubungkan pada ujung yang lain sehingga membentuk sambungan beban dua fasa.

Pada gangguan hubung singkat 3 fasa dan gangguan hubung singkat 2 fasa juga di hitung untuk lokasi gangguan yan di asumsikan terjadi pada 25%, 50%, 75%, 100% panjang feeder.

Gangguan-gangguan tersebut dihitung untuk lokasi gangguan yang terjadi dengan mensimulasikan gangguan yang terjadi pada 25%, 50%, 75% dan 100% dari panjang feeder yang dalam hal ini di anggap nilai dari Z_{1ek} dan Z_{2ek} .



2.8 Koordinasi Rele Arus Lebih di Feeder/Penyulang

2.8.1 Arus Setting

Untuk rele arus lebih dari jenis normal (standard) inverse nilai setelan relenya di feeder atau penyulang dapat dihitung sebagai berikut :

$$I_{set} = 1,05 \times I_{beban} \dots\dots\dots(2.15)$$

Dimana :

I_{set} = Arus yang di setting

I_{beban} = Arus beban

2.8.2 Setelan Waktu (TMS)

Untuk menentukan nilai Tms yang akan di set kan pada rele arus lebih diambil, misal angka arus gangguan (I_{fault}) sebesar arus gangguan 3 fasa pada lokasi gangguan 25% panjang feeder, dan waktu kerja rele arus lebih di feeder itu (sesuai keterangan waktu tercepat diatas) diambil selama 0,3 detik (standard PLN), maka nilai Tms yang akan diset kan pada rele arus lebih adalah :

$$Tms = \frac{t \left\{ \left(\frac{I_{fault}}{I_{set}} \right)^{0,02} - 1 \right\}}{0,14} \dots\dots\dots(2.16)$$

Untuk setelan waktu rele *Standard Inverse* dihitung dengan menggunakan rumus kurva waktu dan arus. Rumus ini bermacam-macam sesuai buatan pabrik pembuatan rele, dalam hal ini diambil rumus kurva waktu dan arus dari standard british, sebagai berikut :

$$t = \frac{0,14 \times tms}{\left(\frac{I_{fault}}{I_{set}} \right)^{0,02} - 1} \dots\dots\dots(2.17)$$

Dimana :

T = Waktu kerja

Tms = Setelan waktu

I_{Fault} = Arus gangguan hubung singkat 3 fasa dan 2 fasa, Untuk setelan OCR (Inverse) diambil arus gangguan hubung singkat terbesar.

I_{set} = Arus yang disetting

2.8.3 Setelan Arus⁹

Untuk menentukan setelan arus yang akan di set pada rele arus lebih, maka kita harus menggunakan rumus tergantung type rele atau pabrik pembuatannya. Pada pembahasan Laporan Akhir ini, gardu induk Seduduk Putih menggunakan rele arus lebih Areva Micom. Rumus untuk menentukan setelan arus pada rele Micom ini adalah sebagai berikut :

$$I_s = \frac{I}{0,02 \sqrt{\frac{T_{ms} \times 0,14}{t} + 1}} \dots\dots\dots (2.18)$$

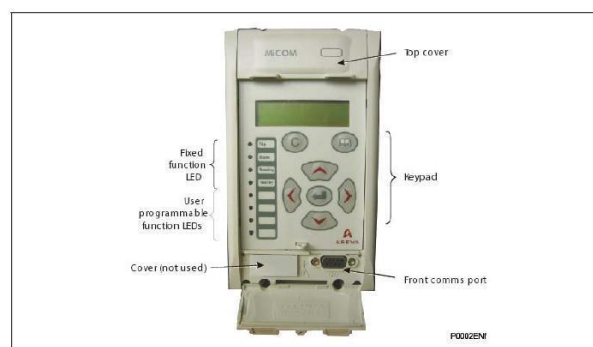
Dimana :

I_s = Arus penyetelan

I = Arus gangguan

T_{ms} = Setelan waktu

t = Waktu setting



Gambar 2.6. Rele Arus Lebih Type Areva Micom